

新疆天山山区乔木林碳密度变化特征及其影响因素

张绘芳¹, 张景路¹, 侯晓巍², 高亚琪¹, 朱雅丽¹, 郑哲¹

(1.新疆林业科学院 现代林业研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2.国家林业和草原局西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 分析山区乔木林的碳密度动态变化特征, 为准确估算新疆山区森林碳储量及未来可持续发展提供科学依据。[方法] 基于 2001—2016 年新疆天山山区乔木林每隔 5 a 进行 1 次的样地调查数据, 运用统计学方法分析了该区域乔木林碳密度的变化特征及其影响因素。[结果] 自 2001—2016 年间, 新疆天山山区乔木林碳密度整体上表现为增长趋势, 不同区域表现为: 天山西部 > 天山东部 > 天山中部, 碳密度变化率表现为: 天山中部 > 天山东部 > 天山西部; 从林龄角度天山山区乔木林碳密度在天山中部和东部地区均表现为随林龄增长先升后降趋势, 近熟林最高, 天山西部则表现为随林龄增加而增长的趋势, 碳密度变化率均表现为随着林龄增加而递减; 从地形因子角度分析在不同坡度呈先升后降趋势, 天山西部和中部地区在斜坡碳密度最高, 天山东部在缓坡碳密度最高, 在不同海拔天山西部和中部地区碳密度随海拔上升整体上呈先升后降趋势, 天山东部则随海拔上升而递减, 在不同坡向碳密度在南坡最低, 其他坡向无明显规律。[结论] 自天保工程实施以来, 天山山区乔木林碳密度持续增长, 其中林龄对碳密度和碳密度变化率影响显著, 因此在森林管理方面应加强科学合理地进行幼林抚育和更新恢复, 优化林龄结构, 进一步提高天山天然林资源的碳汇功能和固碳潜力, 促进该区域森林资源健康可持续发展。

关键词: 天山; 乔木林; 碳密度; 地形

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0122-06

中图分类号: S718.5

文献参数: 张绘芳, 张景路, 侯晓巍, 等. 新疆天山山区乔木林碳密度变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 122-127. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.016; Zhang Huifang, Zhang Jinglu, Hou Xiaowei, et al. Variation characteristics and related factors of carbon density of arbor forest in Tianshan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 122-127.

Variation Characteristics and Related Factors of Carbon Density of Arbor Forest in Tianshan Mountains

Zhang Huifang¹, Zhang Jinglu¹, Hou Xiaowei², Gao Yaqi¹, Zhu Yali¹, Zheng Zhe¹

(1. Modern Forestry Research Institute of Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. North-Western Forest Inventory and Planning Institute, State Forestry Administration, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The dynamic change characteristics of carbon density of arbor forest in Tianshan Mountains were analyzed, in order to provide scientific basis for accurate estimation of forest carbon storage and sustainable development in the future. [Methods] Based on the plots of arbor forest in Tianshan Mountains of Xinjiang area, that were investigated every five years from 2001 to 2016, the variation and related factors of carbon density of arbors in this region were analyzed statistically. [Results] From 2001 to 2016, the carbon density of arbor forests in the Tianshan Mountains of Xinjiang area increased with different degrees: the central part of Tianshan Mountains > the west part of Tianshan Mountains > the east part of Tianshan Mountains, and the carbon density change rate was higher in the central part of Tianshan

收稿日期: 2020-05-20

修回日期: 2020-12-05

资助项目: 新疆自治区公益性科研院所基本科研业务费专项“新疆山区森林乔木层碳储量动态变化研究”(KY2019043), “天山西部天然乔木层碳潜力研究”(KY2020019)

第一作者: 张绘芳(1980—), 女(汉族), 陕西省大荔县人, 硕士研究生, 副研究员, 主要从事森林资源监测与遥感技术应用方面的工作。Email: 396930128@qq.com。

通讯作者: 高亚琪(1961—), 男(汉族), 陕西省杨陵区人, 教授级高级工程师, 主要从事森林资源监测与土地荒漠化方面的研究。Email: gyq611003@163.com。

Mountains than in the east part of Tianshan Mountains than in the west part of Tianshan Mountains. From the perspective of forest age, the carbon density of arbor forests in the central and Eastern Tianshan Mountains showed a trend of first rising and then falling with forest age, and the near mature forests had the highest carbon density. In the Western Tianshan Mountains, the carbon density rate showed an increasing trend with forest age. With terrain changes, the carbon density increased first and decreased afterwards with slope degrees. In the Western and Central Tianshan Mountains, the carbon density was the highest in the steep hill. And in East Tianshan Mountains, the highest carbon density was in gentle slope. With the increase of elevation, the carbon density increased first and decreased afterwards in the western and central parts and decreased in the East Tianshan Mountains. With the change of slope orientation, the carbon density in the south slope was the lowest, and no obvious pattern in others. [Conclusion] Since the implementation of Natural Forest Protection Project, the arbor carbon density increased in Tianshan Mountains, and the forest age has the most significant effect. Therefore, in order to improve the carbon sequestration function of natural forest in Tianshan Mountains and explore the greater carbon potential, we should strengthen the regeneration of young forest, optimize the structure of forest age, and promote the healthy and sustainable development of forest resources.

Keywords: Tianshan Mountains; arbor forest; carbon density; terrain

森林是陆地生态系统重要组成部分,其碳储量约占陆地生态系统碳储量的 $2/3$ ^[1-2],对维护全球碳平衡和应对气候变化方面有十分重要的作用^[3-4]。碳密度是衡量森林生态系统固碳能力的重要指标^[5],研究其变化特征可以为准确估算森林碳储量及未来发展趋势提供数据支撑,对减缓气候变化的碳管理有重要意义。近些年不少学者对森林生态系统的碳储量进行了大量研究,李海奎^[2]根据全国第七次森林资源连续清查数据,运用回归模型估计法估算了全国森林植被乔木林的碳储量;戴前石^[3]、黄从德^[4]、王璟睿^[6]、杨加猛^[7]、昭日格^[8]、王开德等^[9]基于连清数据运用生物量转换因子法分别研究了湖南、四川、广东、江苏、内蒙古、福建等地森林碳储量变化,分析了不同林龄、森林类型等的碳密度变化特征;范春楠^[10]、关晋宏^[11]、王建^[12]利用样地调查数据结合连清数据估算了吉林、甘肃、青藏高原区域森林植被的碳储量、碳密度及固碳速率的变化。现有关于碳储量研究大都集中在林龄、起源和不同森林类型方面碳密度的变化,但结合地形因子分析碳密度变化的研究较少,地形因素影响区域的温度和湿度,了解不同海拔、坡度和坡向条件下碳密度的变化特征对森林科学管理具有参考价值;在碳储量变化方面大都采用固碳速率来反映,但针对碳密度基数相差大的林地用这一指标反映森林碳密度变化快慢可能导致分析结果不准确,因此采用可以科学反映固碳变化快慢的参数对评定森林固碳潜力具有重要意义。

新疆天山天然林是该区森林资源的重要组成部分,担负着调节气候、保护冰川和涵养水源的重要生

态功能,对维护区域生态平衡有极其重要的生态意义^[13]。有学者^[13,16-26]对该区域森林空间分布、资源动态变化、云杉生物量、含碳系数等方面进行研究,但对新疆天山山区天然林资源的碳密度动态变化的研究却鲜见报道。本文以新疆天山山区天然乔木林为研究对象,以 2001—2016 年的森林连续清查的乔木林样地调查为数据基础,运用该区域树种的生物量模型和对应的含碳系数计算碳储量及相关指标,利用统计学原理分析其碳密度随林龄、地形和时间的动态变化特征,为该区域森林碳潜力的评估提供数据支撑,同时为森林经营管理和应对气候变化评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天山是亚洲山系之一,横贯新疆的中部,西端伸入哈萨克斯坦,在我国境内东西长达约 1 300 km,宽度西端约 250~300 km,东端最窄处仅百余公里^[27]。天山山地气候冷暖分明,属温带大陆性气候,年降水量自西到东,逐渐减少,天山北坡在 400~600 mm,南坡在 200~400 mm,由于水热条件的差异也形成了不同的森林植被类型的分布。新疆山区天然林是全疆森林资源的重点,但其分布是不均匀的,其中天山山区是天然乔木林资源的主要分布之一。天山山区天然林垂直分布于海拔 1 500~2 800 m 的中山带,且多分布在阴坡或半阴坡^[27]。现有森林多呈片、块状分布或与草地交错分布,树种单纯,针叶林占绝

大比重,主要树种多为主干挺直的西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)。天山山脉横贯新疆东西,气候条件差异明显,植被分布也存在差异,山地森林乔木林主要分布在天山北坡,在天山南坡也有零星分布,但面积和蓄积比重极小,因此本文研究区域集中在天山北坡。根据自然地理条件和森林分布情况,本文将天山北坡山区可划分为天山西部、天山中部和天山东部 3 个区域^[26]进行碳储量研究,具体划分为天山西部区域包括伊犁州、博乐市、精河县的山区国有林场,天山中部区域自乌苏向东、沙湾县、玛纳斯县、呼图壁县、乌鲁木齐和昌吉地区的山区林场,天山东部区域包括哈密、巴里坤、伊吾县的山区林场。

1.2 数据收集

乔木林样地数据来源新疆 2001—2016 年森林资源连续清查的 4 期调查数据,调查样地设置是在研究区范围内以 6 km×4 km 网格交叉点进行设置,在从中选出地类为乔木林的样地,其规格是 0.08 hm²,调查因子包括样地号、地理坐标、样地类型、平均胸径、郁闭度、平均年龄、龄组、海拔、坡度、坡向等;样地树木进行每木检尺,运用专业工具测量树木的胸径和树高并进行编号。①林龄划分依据森林资源 2 类调查细则中龄级的划分原则对样地的平均林龄进行各龄

级划分。②地形因子按照海拔划分以每 300 m 为 1 级,共划分为 7 级:小于 1 200 m,1 200~1 500 m,1 500~1 800 m,1 800~2 100 m,2 100~2 400 m,2 400~2 700 m,2 700~3 000 m;③坡向划分 8 个方向:北坡(337.5°~22.5°)、东北坡(22.5°~67.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、东南坡(112.5°~157.5°)、南坡(157.5°~202.5°)、西南坡(202.5°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)、西北坡(292.5°~337.5°);坡度划分为 6 个等级:平坡(<5°)、缓坡(5°~15°)、斜坡(15°~25°)、陡坡(25°~35°)、急坡(35°~45°)、险坡(>45°)。

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)的中国地面气候资料,收集了日最高气温、日最低气温、年降水量、太阳辐射等数据。

1.3 数据处理与计算

(1) 乔木林的碳密度。碳密度指单位面积的碳储量,各树种的生物量模型采用张绘芳^[19-20]、高亚琪等^[21]所构建的新疆天然林各树种一元生物量模型(表 1)计算样地中所有树木的生物量,乘以含碳系数(朱雅丽^[22-23]研究该区域各树种的含碳系数)得出碳储量,然后除以样地面积计算出碳密度。其中针对分布很少的冷杉其碳储量计算以云杉为参考。

表 1 新疆山区乔木林各优势树种生物量模型

树种	落叶松	云杉	桦树	欧洲山杨
模型	$W_{\text{地上}} = 0.093 4D^{2.409 7}$ $W_{\text{根}} = 0.054 4D^{2.114 6}$	$W_{\text{地上}} = 0.166 1D^{2.252 8}$ $W_{\text{根}} = 0.036 54D^{2.361 9}$	$W_{\text{地上}} = 0.163 6D^{2.302 3}$ $W_{\text{根}} = 0.050 54D^{2.175 2}$	$W_{\text{地上}} = 0.108 9D^{2.399 0}$ $W_{\text{根}} = 0.065 6D^{2.147 6}$
含碳系数	0.47	0.46	0.45	0.44

注:W 代表生物量,D 代表胸径;全株生物量是地上生物量与根生物量之和。

(2) 乔木林的碳密度变化率。林地碳密度较高和较低的林地在单位时间和单位面积上都增加或减少相同碳储量所反映该林地的固碳潜力是不同的,为了客观反映森林固碳潜力本文运用碳密度变化率指标判定。

碳密度变化率是指某时间段植被单位面积碳储量的变化量占原单位面积碳储量的百分比,变化率越大表示碳密度变化的越快,反之亦然。计算公式为:

$$a = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \quad (1)$$

式中:a 表示碳密度变化率; C_1 、 C_2 表示两个不同时期林分碳密度。

(3) 运用 SPSS 统计软件分析碳密度和碳密度变化率。

2 结果与分析

2.1 研究区 2001—2016 年碳密度动态变化

整体上天山山区乔木林碳密度在 2001—2016 年呈增长趋势,平均碳密度从 2001 年的 66.72 t/hm² 增长到 2016 年的 74.68 t/hm²,增长了 7.96 t/hm²,说明自天然林资源保护工程实施以来天山山区森林碳汇能力不断增强(图 1),在不同调查期天山不同区域乔木林平均碳密度呈:天山西部>天山东部>天山中部,天山西部年降水量丰沛,前山带有明显的逆温层,气候温暖湿润,土壤多为灰褐色森林土,厚度较厚,该区域的云杉是新疆的精华。

由表 2 可以看出,乔木林碳密度变化率表现为:天山中部>天山东部>天山西部,说明在乔木林碳密

度变化快慢方面天山中部和东部增长较快,天山西部则最慢。天山中部的碳密度变化率在 2011—2016 年明显高于前两个调查间隔期,结合气象数据该区域在 2011—2016 年年平均降水量 280.37 mm,是前两期的 2 倍多,该区域乔木林以云杉为主,张艳静^[31]研究表明云杉生长与降水呈显著正相关,因此碳密度变化率的变化可能是降水量变大所致。天山东部的碳密度变化率在 2006—2011 年调查间隔期明显低于其他两个调查间隔期,结合气象数据该调查间隔期的日平均温度比其他调查期偏低 4℃左右,天山东部乔木林以落叶松为主,罗磊^[30]研究表明气温对落叶松碳密度的贡献远大于降水,因此该调查期碳密度变化率偏低可能是由于温度降低所致。天山西部乔木林碳密度变化率变化不明显。

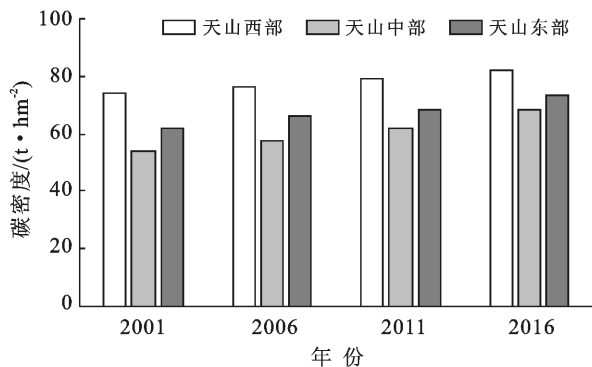


图 1 天山山区不同时期乔木林碳密度变化

表 2 不同调查期间天山山区乔木林碳密度变化率 %

项目	2001—2006 年	2006—2011 年	2011—2016 年
天山西部	3.12	3.61	3.83
天山中部	6.68	7.20	11.46
天山东部	7.07	3.20	6.50

2.2 乔木林碳密度的影响因素

2.2.1 碳密度变化影响因素相关性分析 由表 3 统计分析可以看出,乔木林碳密度与林龄显著正相关、与坡度呈显著负相关,与海拔、坡向相关性不显著;碳密度变化率与林龄呈显著负相关,与海拔、坡度和坡向地形因子相关性均不显著。说明林龄是影响天山山区乔木林碳密度变化的关键因素。

表 3 不同因子与乔木林碳密度相关性分析

项目	分析方法	林龄	海拔	坡向	坡度
碳密度	Pearson 相关性	0.283**	-0.026	0	-0.323**
	显著性(双侧)	0.000**	0.601	0.993	0.000**
碳密度变化率	Pearson 相关性	-0.325**	-0.036	-0.018	0.048
	显著性(双侧)	0.000**	0.470	0.719	0.330

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.2.2 不同因素乔木林碳密度变化分析

(1) 不同林龄乔木林碳密度变化。根据调查数据计算不同林龄天山 3 个区域的乔木林平均碳密度及碳密度变化率(图 2),天山西部山区乔木林在不同林龄的平均碳密度呈随着林龄增长而增长的趋势,天山中部和东部山区乔木林平均碳密度从幼龄林到近熟林阶段随林龄增长而增长,在近熟林至过熟林阶段呈先降后升趋势,碳密度在近熟林最高。天山山区 3 个区域乔木林碳密度变化率均表现为随着林龄的增加呈递减趋势,在幼龄林至近熟林递减幅度较大,近熟林至过熟林递减平缓,这是由于林木在幼中龄林阶段处于树木的快速生长期,碳储量的积累较迅速,到近熟林后生长速度慢慢减缓;天山东部碳密度变化率除幼龄林缺失外在中、近、成、过熟林阶段均表现为较高,说明天山东部乔木林生长过程中碳密度增长较天山西部和中部地区快,碳汇功能表现更强。

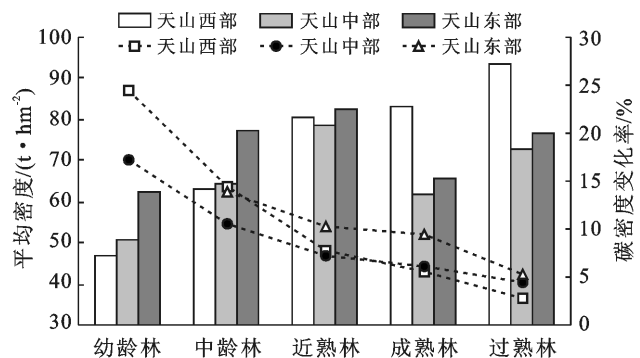


图 2 不同林龄乔木林平均碳密度和碳密度变化率的变化

(2) 不同地形因子乔木林碳密度的变化。由图 3 所示,天山山区乔木林碳密度整体在不同坡度呈先升后降趋势,在缓坡、斜坡和陡坡上相对较高,急坡和险坡急剧下降。天山西部表现为先升后降,在斜坡碳密度最高;天山中部在平坡、缓坡、斜坡和陡坡上碳密度变化比较平缓,急坡开始下降,险坡很低,只有 1.54 t/hm²;天山东部从平坡至缓坡碳密度快速增长达最高,在斜坡又明显降低,斜坡至急坡变化平缓,险坡又急剧下降。由图 4 所示,天山山区乔木林碳密度随海拔升高呈现不同趋势,天山西部碳密度随海拔升高呈先升后降趋势,在 200~240 m 出现峰值,该区域在 1500 m 以下主要分布杨树、野苹果、野山杏等阔叶林,碳密度较小,云杉林主要分布在 1500~2800 m,长势较好,但在 1800~2100 m 碳密度偏低,主要原因是该海拔段样地数据幼中龄林占比较高;天山中部乔木林碳密度自 1500 m 开始随海拔升高呈先升后降趋势,在 1800~2100 m 达峰值,碳密度变化差异不大;天山东部乔木林碳密度自 2100 m 开始随海拔升高

而降低,在2 100~2 700 m降低幅度很小,到2 700 m以上碳密度明显降低,3 000 m以上降至1.15 t/hm²。由图5所示,在不同坡向上,乔木林碳密度较高天山西部和中部除了南坡碳密度最低外,其他坡向没有明显规律,天山东部样地分布在北坡、西北坡和东北坡,碳密度均较高。

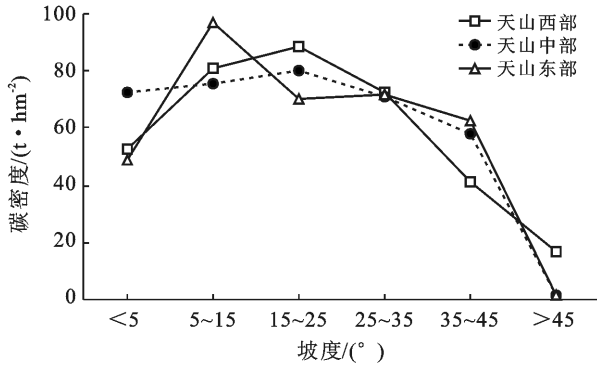


图3 天山山区不同坡度乔木林碳密度变化

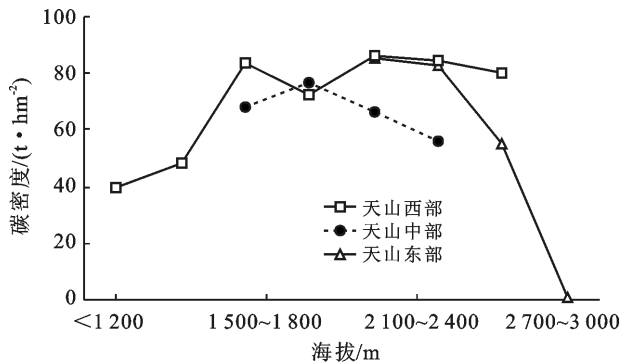


图4 天山山区不同海拔乔木林碳密度变化

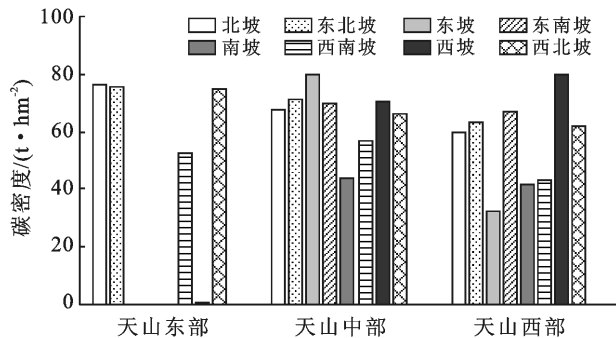


图5 天山山区不同坡向乔木林碳密度变化

3 讨论与结论

3.1 讨论

在林分尺度上天山山区乔木林碳密度与林龄呈显著相关,天山西部则表现为随林龄增加而不断增长的趋势,天山中部和东部地区均表现随林龄增长先升

后降趋势,在近熟林最高,碳密度的变化受气温、水分、太阳辐射和土壤等多种因素影响,西部伊犁地区温暖湿润,降水丰沛,中部和东部受荒漠气候影响,寒冷干旱,降水较西部少,天山土壤养分含量由西向东呈递减趋势^[26],自然条件的差异导致树木生长情况,从而影响碳密度。天山山区乔木林碳密度与坡度呈显著性相关,与沈彪^[28]研究秦岭中段南坡油松林碳密度结论一致;在不同坡度上研究区碳密度呈先升后降趋势,天山西部和中部地区在斜坡碳密度最高,说明该坡度最适宜云杉林生长,天山东部在缓坡碳密度最高,该区乔木林以落叶松为主,新疆落叶松喜光性强,对土壤水份要求较高,因此在土层深厚、湿润、疏松的缓坡地带生长旺盛;丁程锋^[14]、张绘芳^[27]分析天山中部和西部天然林分布主要分布在斜坡、陡坡和急坡上,但本文研究乔木林碳密度在急坡上急剧下降,说明在急坡上虽然乔木林面积分布较广,但由于坡度较大,降水的冲刷使得土层厚度较薄,土壤持水性差,没有充足的营养供给树木生长导致碳储量降低。

本文运用碳密度变化率来反映林木的固碳潜力,这一指标可以消除基数大小对碳密度变化的影响,研究区碳密度变化率与林龄显著相关,表现为随着林龄增加而递减,说明幼、中龄乔木林是未来森林系统的固碳潜力所在,在不同调查期乔木林碳密度变化率表现为天山中部最高,主要因素是该区域幼中林龄占比较大,具有较大的碳汇发展空间。

3.2 结论

(1) 本文阐明了天山西部、中部和东部3个区域的乔木林碳密度变化规律,并从林龄、立地因子方面分析了该区域乔木林碳密度在林分尺度上变化特征,为准确估算新疆山区森林碳储量及未来可持续发展提供科学依据。

(2) 自天保工程实施以来新疆天山山区乔木林碳密度在2001—2016年呈增长趋势,不同区域呈现:天山西部>天山东部>天山中部;天山山区乔木林碳密度随着林龄增长天山西部呈增长趋势,天山中部和东部呈先降后升趋势,近熟林最高;在不同坡度上碳密度呈先升后降趋势,天山西部和中部地区斜坡最高,天山东部缓坡最高,急坡和险坡均急剧下降,在不同海拔上碳密度天山西部和中部随海拔上升整体上呈先升后降趋势,天山东部则随海拔上升而递减,在不同坡向上碳密度在南坡最低,其他坡向无明显规律。乔木林碳密度变化率表现为随着林龄增加而递减,不同区域呈:天山中部>天山东部>天山西部。

(3) 林龄对天山山区乔木林碳密度和碳密度变化率的影响均呈显著相关,因此在森林管理方面应加

强科学合理地进行幼林抚育和更新恢复,优化林龄结构,进一步提高天山天然林资源的碳汇功能,挖掘更大碳潜力,促进该区域森林资源健康可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] 戴巍,赵科理,高智群,等.典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征[J].生态学报,2017,37(22):7528-7538.
- [2] 李海奎,雷渊才,曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学,2011,47(7):7-12.
- [3] 戴前石,胡觉,李建军.基于连清数据的湖南森林碳密度估计及变化特征分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):129-135.
- [4] 黄从德,张健,杨万勤,等.四川森林植被碳储量的时空变化[J].应用生态学报,2007,18(12):2687-2692.
- [5] 宋超.陕西省典型森林生态系统固碳速率及潜力研究[D].中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [6] 王璟睿,仵宏基,孙昕,等.广东省森林碳储量与动态变化[J].东北林业大学学报,2016,44(1):18-22.
- [7] 杨加猛,杜丽永,蔡志坚.江苏省森林碳储量的区域分布研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(7):84-89.
- [8] 昭日格,岳永杰,姚云峰,等.内蒙古自治区森林碳储量及其动态变化[J].干旱区资源与环境,2011,25(9):80-84.
- [9] 王开德,邓璐莹.基于森林清查资料的福建森林植被碳储量及其动态变化[J].福建林学院学报,2014,34(2):145-151.
- [10] 范春楠,韩士杰,郭忠玲,等.吉林省森林植被固碳现状与速率[J].植物生态学报,2016,40(4):341-353.
- [11] 关晋宏,杜盛,程积民,等.甘肃省森林碳储量现状与固碳速率[J].植物生态学报,2016,40(4):304-317.
- [12] 王建,王根绪,王长庭,等.青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力[J].植物生态学报,2016,40(4):374-384.
- [13] 丁程锋,张绘芳,高亚琪,等.乌鲁木齐河流域天山云杉林空间分布格局分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):190-195.
- [14] 许文强,杨辽,陈曦,等.天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素[J].植物生态学报,2016,40(4):364-373.
- [15] 郑拴丽,许文强,杨辽,等.新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J].自然资源学报,2016,31(9):1553-1562.
- [16] 丁程锋,张绘芳,李霞,等.天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估:以乌鲁木齐河流域为例[J].生态学报,2017,37(11):3733-3743.
- [17] 张景路,张绘芳,地力夏提·包尔汉,等.基于 Landsat 数字影像的阿尔泰山乔木林空间分布[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(4):153-158.
- [18] 张绘芳,张景路,朱雅丽,等.天山西部天然乔木林空间分布与地形因子的定量关联[J].新疆农业科学,2020,57(1):139-148.
- [19] 张绘芳,地力夏提·包尔汉,朱雅丽,等.新疆疣枝桦与欧洲山杨生物量分配与异速生长模型分析[J].西北林学院学报,2017,32(5):33-38.
- [20] 张绘芳,高亚琪,朱雅丽,等.新疆雪岭杉生物量对比研究[J].西北林学院学报,2015,30(6):52-58.
- [21] 高亚琪,张绘芳,地力夏提·包尔汉,等.西伯利亚落叶松天然林立木生物量估算模型研究[J].新疆农业科学,2016,53(4):655-662.
- [22] 朱雅丽,张绘芳,高亚琪,等.新疆西伯利亚落叶松含碳系数分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(3):198-202.
- [23] 朱雅丽,高亚琪,张绘芳,等.新疆西伯利亚云杉含碳系数分析[J].林业资源管理,2016(3):44-48.
- [24] 罗庆辉,许仲林,徐泽源,等.天山雪岭云杉个体生物量分配及其变化规律的研究[J].干旱区地理,2019,42(6):1378-1386.
- [25] 刘贵峰,刘玉平,郭仲军.天山云杉林生物量及其变化规律的研究[J].西北林学院学报,2013,28(5):13-17.
- [26] 王燕,赵士洞.天山云杉林生物量和生产力的研究[J].应用生态学报,1999,10(4):389-391.
- [27] 《新疆森林》编著委员会.新疆森林[M].新疆乌鲁木齐:新疆人民出版社,1989.
- [28] 沈彪,党坤良,武朋辉,等.秦岭中段南坡油松林生态系统碳密度[J].生态学报,2015,35(6):1798-1806.
- [29] 彭守璋,赵传燕,郑祥霖,等.祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1689-1694.
- [30] 罗磊,王蕾,刘平,等.阿尔泰山落叶松林碳储量与生产力时空特征及其气候成因分析[J].生态学报,2019,39(22):1-10.
- [31] 张艳静,郑宏伟,于瑞德,等.天山中西段不同地区雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J].植物研究,2017,37(3):340-350.